Proceedings of 5º Encuentro de Potencia, Instrumentación y Medidas, IEEE, October 19-20, 1999, Montevideo, Uruguay

Factibilidad del uso de energía eléctrica de origen eólico en plantas de saneamiento de Montevideo conectadas a la red

Ventura Nunes
Departamento de Potencia
IIE-FI-UDELAR

Jose Cataldo
IMFIA-FI-UDELAR

Gonzalo Casaravilla
Departamento de Potencia
IIE-FI-UDELAR

Raul Zeballos
Departamento de Potencia
IIE-FI-UDELAR

I. RESUMEN

El Grupo de Trabajo en Energías Renovables de la Facultad de Ingeniería propuso a la Intendencia Municipal de Montevideo (IMM) la realización de un estudio de factibilidad de la utilización de aerogeneradores como generadores propios, asociados a las plantas de saneamiento de la ciudad.
La ley de marco regulatorio, al crear un nuevo ámbito en la generación y comercialización de energía eléctrica, agrega un nuevo componente a estos estudios de factibilidad.
Por otra parte, la IMM tiene interés en las posibles ventajas medioambientales de la utilización de dicha energía.
El estudio comprendió un análisis de la demanda de cada una de las plantas, modelando su consumo, y del recurso eólico disponible en el sitio, así como un estudio de impacto visual y auditivo de los generadores a instalarse.
En el estudio de factibilidad, se tuvo en cuenta el impacto económico de la venta de excesos de energía generada por los aerogeneradores, considerando distintos precios de venta de los mismos. En este artículo, se hace referencia principalmente a la instalación en Punta Carretas.

II. INTRODUCCION

A los efectos de realizar el estudio de factibilidad del uso de energía eléctrica de origen eólico, se consideró, en primera instancia, todos los lugares donde existen instalaciones industriales de saneamiento en el Departamento de Montevideo.

Se desecharon aquellas instalaciones con potencias instaladas muy pequeñas, ya que los aerogeneradores de potencias menores a 100 kW tienen características técnicas sensiblemente diferentes a los de mayor potencia y costos por kW instalado mayores. Por lo tanto, no se considera de interés la instalación de aerogeneradores en ese rango de potencia para esta aplicación.

También se desechó la instalación de aerogeneradores en las plantas de Ejido y Punta Gorda. Dada su inserción en la ciudad y la exigua superficie disponible del lado del mar, se consideró inapropiado, desde el punto de vista urbanístico, la utilización de los jardines de la rambla para este propósito.

En todos los lugares potenciales, se relevó el equipamiento instalado y se tomó conocimiento de la topografía del lugar, de la superficie utilizable para este fin y de la presencia de instalaciones o edificios vecinos.

En la Tabla 1, se indica los datos del transformador de la subestación de UTE y la potencia instalada en las bombas para cada uno de los cuatro lugares que no fueron excluidos inicialmente.

Tabla 1. Datos relevados

Lugar	Transformador		Bombas		
	[kVA]	[kV]	[HP]	[kW]	Num.
Punta Carretas	1250	6.3/0.4	250	186,5	3
	315	6.3/0.4	75		2
			equipos accesorios		
Puerto Buceo	100	6.3/0.4	25	18,65	2
Punta Gomensoro	630	6.3/0.4	150	111,9	3
Chacarita	800	6.3/0.4		150	4

Además, se hizo una determinación preliminar de zonas de Montevideo donde el potencial eólico disponible puede tener valores interesantes desde el punto de vista de su utilización en plantas industriales, encontrándose que todo el departamento tiene posibilidad exceptuando las zonas densamente urbanizadas.

III. DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD Y DIRECCION DE VIENTO EN LOS LUGARES CONSIDERADOS.

El análisis de las características del viento en el sitio considerado se hizo sobre la base de las series históricas de velocidad y dirección de viento relevadas en estaciones meteorológicas y de los tipos de exposición al viento que presenta el sitio para las diferentes direcciones de la rosa de los vientos. Los aerogeneradores se encuentran sumergidos, principalmente, en la sub capa logarítmica de la capa límite atmosférica. Este tipo de situación se da cuando el terreno corriente arriba es del tipo mar o tipo rural. En la mencionada región del flujo atmosférico la distribución de la velocidad media en altura obedece a una ley tipo logarítmica (Simiu & Scanlan, (1986)), como la que se presenta a continuación,

$$U = \frac{u*}{k} L \frac{z-d}{z_0} \qquad (1)$$

U es la velocidad media a la altura z, d es la llamada altura del plano de desplazamiento nulo y z_0 es la longitud de rugosidad. Cada tipo de terreno presenta diferentes valores de los parámetros característicos.



Figura 1

Se destaca que los datos de velocidad media del viento utilizados se obtienen a 10m sobre el terreno circundante. Por otro lado las curvas características de las turbinas eólicas vinculan la velocidad media del viento a la altura del eje de la máquina con la potencia generada por la misma, siendo entonces necesario estimar el valor de la velocidad media del viento a dicha altura lo cual se efectuó sobre la base de los parámetros característicos correspondientes al sitio donde se ubica el aerogenerador y de los parámetros característicos del sitio donde se obtuvieron los datos de viento.

Para ciertas direcciones del viento y en alguno de los sitios considerados los aerogeneradores podrán quedar sumergidos en la estela de grandes obstáculos como lo son los edificios cercanos, de alturas del mismo orden que la altura de las máquinas. El flujo en esa región depende fuertemente de la geometría de los obstáculos. En estos casos, a los efectos de estimar la velocidad media del viento a la altura del eje de los aerogeneradores, se recurrió a datos obtenidos a partir de ensayos en el túnel de viento y a datos obtenidos en la realidad.

III a - Características del viento en Punta Carretas

En la figura 1, se presenta una imagen de la carta geográfica donde se identifica Punta Brava de las Carretas. Para las direcciones WNW, W, WSW, SW, SSW, S, SSE, SE, ESE, E, ENE el terreno corriente arriba del sitio es tipo de mar. Para las direcciones NW, NNW el tipo de terreno es rural, Para las direcciones N, NNE y NE el viento proviene desde un terreno tipo ciudad. A continuación, se presenta el valor de los diferentes parámetros característicos correspondientes a cada tipo de terreno (Counihan, J., (1975), ESDU, (1985), Wang, Z.Y. et al. (1996))

Tipo de terreno	z0 (cm)	d (m)
Mar	0,3	0
Rural	5	0
Ciudad	200	20

En las figuras 2 y 3 se presentan los histogramas de velocidad y de dirección de viento a 30m sobre el suelo.

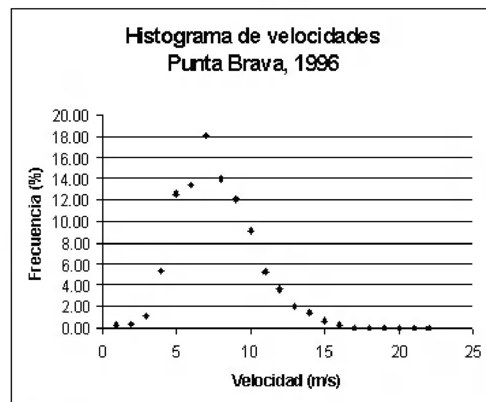


Figura 2



Figura 3

IV. ESCENARIOS DE ESTUDIO DE FACTIBILIDAD

La determinación de los escenarios de estudio se estableció considerando los puntos de vista financiero y de uso racional

del recurso eólico. Para todos los estudios, se establecieron criterios generales que se describen a continuación.

IV a - Aspectos económicos

Se realizaron cálculos en dólares constantes por lo que no se tuvo en cuenta la eventual inflación en dólares

A los efectos de analizar la sensibilidad del proyecto a la eventual suba o baja de la tarifa de energía se realizaron los cálculos asumiendo estabilidad de la misma, incremento y decremento del 10% en 15 años.

Se hace notar que la hipótesis de baja del precio de la energía parece muy remota en virtud de que los márgenes respecto al costo de generación son muy pequeños si se toma en cuenta la tarifa vigente utilizada para el presente cálculo.

El cálculo de la tasa de retorno se hizo en un plazo de 15 años y se consideró que la instalación inicial pierde todo su valor al cabo de 20 años, por lo que, al momento de evaluar la TIR (15 años) la instalación tiene un costo remanente de 25% del capital inicial.

Respecto a los impuestos aplicables, se supuso que no se pagarán impuestos (aranceles aduaneros ni IVA) en los suministros. Se paga IVA por mantenimiento y seguro.

El fundamento de esta última hipótesis de cálculo escapa a este estudio pero se destaca el carácter medio-ambientalista del emprendimiento que, al igual que en otros países, deberá ser motivo de estudio en nuestro país.

Con respecto al costo de la energía, la misma es con el IVA incluido en virtud que ésta es la condición actual de pago de la IMM y no tiene posibilidad de descontarlo ya que las Intendencias no recaudan por dicho concepto.

De acuerdo a las categorías que establece UTE y el tipo de conexión de las estaciones de bombeo en 6kV se utiliza la tarifa "Grandes Consumidores", (G.C-2) actualmente aplicada.

Esta corresponde a los servicios que presenten consumo medio igual o mayor a 100.000 kWh/mes y potencia contratada igual o mayor a 200 kW.

El cargo por energía mostrado en la Tabla 2 se distribuye en tres períodos horarios:

- horas de punta: de las 18 a las 22 hs.
- horas de llano: de las 7 a las 18 hs. y de las 22 a las 24 hs.
- horas de valle: de las 0 a las 7 hs.

Tabla 2. Tarifa aplicada

	U$S/MWh	
	Nominal	+IVA
Valle	17	21
Llano	36	44
Punta	129	159

IV b - Uso racional de recurso eólico

Se establece dos posibilidades: que se puede vender el exceso de energía y que no se puede vender.

En el caso de no generar energía excedentaria, se pagaría a la empresa distribuidora el saldo neto de energía entrante al precio de lista más el IVA correspondiente. Por lo tanto, se puede considerar como si la energía generada se vendiera al precio de la tarifa.

Aun en el caso de no poder vender energía excedentaria, se puede instalar un generador de mayor porte que aquél que no genera excesos, de costo unitario menor y que aprovecha mejor los ahorros generados por efecto de la tarifa triple horaria.

En virtud de la no definición actual por parte de la reglamentación del marco regulatorio de la compra venta de energía ni del caso especial de la energía eólica de costo marginal nulo, se asumió para la posible venta de energía un modelo "especial" razonable con precio constante de la energía generada.

Con el objeto de analizar el impacto de la tarifa con que se vendería la energía, se supuso precios de 10, 20, 30 y 40 dólares por MWh entregado.

Conceptualmente, se dejará el equipamiento de medida y el procedimiento de cobro actual y se agregará un medidor que registrará la energía activa entregada por la instalación a la red de distribución. Es esta última la que se calculará con los precios constantes de acuerdo al criterio ya explicado. En la facturación mensual, UTE descontará a la IMM el monto resultante de esta energía excedentaria.

Se hace notar que si disminuye la potencia activa que "consume" la instalación y se mantiene la reactiva constante, el factor de potencia baja, por lo que aumenta la penalización por consumo de reactiva. En este primer análisis de factibilidad, no se tuvo en cuenta este aspecto.

V. MODELO DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

El objetivo de este capítulo es el análisis de los datos históricos, el modelado del consumo de energía horario y las previsiones de ampliaciones del sistema. Sólo se presenta aquí el estudio hecho para Punta Carretas.

Los datos disponibles son:

- Volumen de agua bombeada diaria de los años 1994, 1995, 1996 y 1997.
- Volumen de agua bombeada horaria del día típico de cada mes de 1994, 1995, 1996 y 1997.
- Registro horario de tres días consecutivos de variables eléctricas e hidráulicas de la estación de bombeo.

El caudal bombeado anual es, entre los años 1996 y 1999, levemente ascendente, del orden de 5% anual. De acuerdo a previsiones establecidas por técnicos de la IMM, en el 2000 se operará un incremento de 98% respecto al 1997 en virtud de nuevas obras en curso. Luego se modelará un aumento porcentual constante hasta llegar al 126% respecto al 1997 (2.26 veces) dentro de los 15 años del estudio financiero o sea en el año 2013.

De los registros no surge correlación entre los meses del año y los niveles de bombeo.

Se aprecia sin embargo un claro perfil de demanda diaria similar al que se tiene en la distribución de energía eléctrica que más adelante se mostrará como esto incide negativamente en el ahorro energético, dado que el viento en el lugar está en contrafase con el bombeo y la tarifa.

De los datos registrados manualmente por personal del la IMM durante tres días consecutivos de operación de la planta de bombeo, resulta claramente que la potencia de consumo normal es una o dos bombas. Cada una de las mismas tiene consumo aproximadamente constante estimado en 150kW.

Del análisis de las gráficas de bombeo diaria, se aprecia que existen momentos en que están las tres bombas en funcionamiento.

La operativa instante a instante de las bombas es tal que la lógica del sistema se encarga de entrarlas y ponerlas fuera de servicio cíclicamente.

Se supuso que consumen potencia y entregan caudal constantes.

De los registros históricos, resulta evidente que en algunas horas el porcentaje del tiempo que las bombas estuvieron en servicio fue parcial, por lo que se modelará para cada hora una potencia consumida equivalente al caudal bombeado.

Se asumirá como caudal nominal de una bomba 4500 m3/h y un consumo de 150kW.

A los efectos de estimar la potencia consumida hora a hora, se tomará para cada día de cada mes el registro horario del día típico del mes correspondiente.

Se descarta la simplificación de imponer para cada día del año el día promedio del año, dado que, este "promedio", elimina virtualmente la posibilidad de considerar la operación simultánea de las tres bombas, que teniendo en cuenta la tarifa triple horaria, incidirá negativamente en el ahorro anual.

VI. RESULTADOS EN PUNTA CARRETAS

A título de ejemplo, se muestran los resultados de considerar la instalación de hasta cuatro generadores de dos características diferentes que denominaremos MARCA1 y 2.

Tal como se comentara anteriormente, en la Fig. 4 se aprecia como para el último año del estudio, la curva de GENERACION eólica y de CONSUMO (esta última en fase con la tarifa) están en contrafase.

Tabla 3. Balance en kWh y U$S último año de estudio

		BALANCE ENERGETICO			**kWh**	Max kW	FACTURACION		U$s
Generador	kW	Generación	Consumo	Entrante	Saliente	Saliente	Fac.cap	ACTUAL	ENTRANTE	SALIENTE
2xMARCA1	450	1596142	4435330	2856205	17018	186	41%	200,870	133,602	681
3xMARCA1	675	2394213	4435330	2235593	194476	406	41%	200,870	105,901	7,779
4xMARCA1	900	3192284	4435330	1838022	594976	626	41%	200,870	87,628	23,799
2xMARCA2	300	1567970	4435330	2874149	6789	102	60%	200,870	134,676	272
3xMARCA2	450	2351955	4435330	2205695	122320	279	60%	200,870	104,973	4,893
4xMARCA2	600	3135940	4435330	1771588	472198	457	60%	200,870	84,983	18,888

La Tabla 3 muestra el balance energético y monetario para el último año en el caso que la energía fuese comprada por el sistema de distribución a 40 U$S/MWh.

Por ejemplo, si no se pone generación eólica, en el año 2013 se pagarán U$S 200.000 anuales por concepto de energía.

Si se instalaran cuatro generadores MARCA2, lo que equivale a una capacidad instalada de 600kW, se tendría una generación eólica de 3.1 GHh frente a un consumo de 4.4 GWh. Esto representaría, en el caso de no vender la energía, un ahorro estimado en 115.000 U$S anuales, y si se logra colocar el excedente a 40U$S/MHh, se tendría una ganancia de aproximadamente 134.000 U$S anuales.

Esta misma cuenta se realiza para los 15 años de estudio, se contabilizan costos de mantenimiento y seguro, se toma el capital inicial de inversión y el remanente al cabo de 15 años y se obtiene como resultado primario la tasa interna de retorno para las diferentes alternativas.

La Tabla 4 muestra para este mismo caso los resultados obtenidos en cuanto a tasas de retorno en los diferentes escenarios estudiados.

Por ejemplo, se puede apreciar que sin venta de energía, el óptimo de TIR de 7.3% desde el punto de vista de inversión se obtiene con dos generadores MARCA2. Sin embargo se debe hacer notar que el ahorro, por ejemplo nuevamente en el 2013, será según se desprende de la Tabla 3, 65.000 U$S anuales frente a los 134.000 ya vistos para cuatro generadores. Si bien la tasa de retorno cae al 4.6% el volumen de dinero ahorrado es sensiblemente mayor.

En el caso de tener venta de energía, la posición más conveniente depende de cuantos dólares se logren obtener de la energía excedentaria. Si no se logra un precio mayor a 10 U$S/MWh, parece razonable seguir dejando dos generadores,

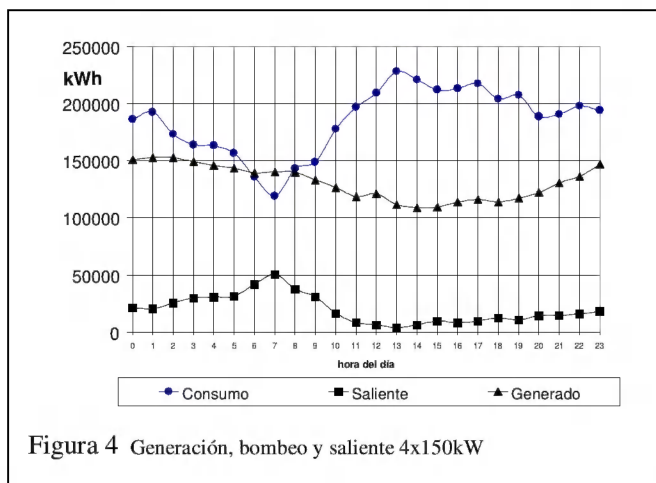


Figura 4 Generación, bombeo y saliente 4x150kW

si por el contrario se logra en precio de venta de 40U$S/MWh, los 4.6% de TIR se transforman en 7.8% para el caso de instalar cuatro generadores MARCA2.

Se hace notar que el precio de 40 U$S el MWh, es superado en varios países como remuneración de la energía eléctrica de origen eólico.

VII. EMISIONES ACÚSTICAS

Para todo los lugares estudiados se realizaron estudios específicos. En particular, para Punta Brava, donde la distancia entre la fuente y el punto más cercano es de 800m, el nivel de presión sonora resulta ser para los aerogeneradores seleccionados de $L_P = 26{,}4$dB

Este nivel sería el que se registraría en un estudio de audio vacío. Esto llevaría a concluir que cualquier otra fuente acústica, inclusive durante las horas de la noche que serían las de menores registros de ruido, produciría un nivel de presión sonora mayor que impediría la percepción del ruido que emitirían los aerogeneradores.

VIII. CONCLUSIONES

El uso de la energía eléctrica de origen eólico en las plantas de saneamiento de Montevideo presenta factibilidad técnica por demás atractiva al obtenerse excelentes factores de utilización en los generadores y al no presentarse contaminación acústica en la zona habitada.

La factibilidad económica se ve fuertemente influida por la forma como se valorice la energía que se produce en exceso en cierto períodos, dada la variabilidad esencial de este recurso.

Los proyectos cambian radicalmente de perfil según los posibles valores de venta de la energía dado que este parámetro determina la utilización o no de economías de escala en los generadores, aunque exista potencial eólico disponible.

Indirectamente, este estudio mostró la urgente necesidad de que se reglamente definitivamente y en todos sus detalles las normas reguladoras del mercado eléctrico en el país.

IX. MENCIONES

Este trabajo presenta parte de los estudios realizados en el marco del Convenio "Utilización de energía Eléctrica de origen eólico en plantas de saneamiento" firmado con la Intendencia Municipal de Montevideo.

X. BIBLIOGRAFIA

Counihan, J., (1975), “Adiabatic atmospheric boundary layers: A review and analysis of data from period 1880-1972”, *Atmospheric Environment*, vol.79, 871-905.

ESDU, (1985), “Characteristics of atmospheric turbulence near the ground. Part II: single point data for strong winds (neutral atmosphere) “, Item Number 85020.

Gaja, E., (1996) “Ingeniería Acústica Ambiental”, Departamento de Física Aplicada, Universidad Politécnica de Valencia, SPUPV. 96.5631.

Harris,C.M. (1995).“Manual de medidas acústicas y control de ruido”, 3ra. Ed., McGraw Hill, España.

Simiu & Scanlan, (1986), “Wind Effects on structures: An introduction to wind engineering”,John Wiley & Sons.

Wang, Z.Y., Plate,E.J., Rau, M. & Keiser, R., (1996), “Scale effects in wind tunnel modelling”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 61, 113-130.

Tabla 4. Análisis de la TIR para ventas a 10 y 40 U$S/MHh y variaciones de tarifa

Venta a	0.01	SUBA DE TARIFA		TARIFA ESTABLE		BAJA DE TARIFA	
Generador	**kW**	**Sin venta**	**Con venta**	**Sin venta**	**Con venta**	**Sin venta**	**Con venta**
2xMARCA1	450.00	5.8%	5.9%	**4.8%**	**4.9%**	3.7%	3.8%
3xMARCA1	675.00	4.6%	5.0%	**3.6%**	**4.0%**	2.6%	3.0%
4xMARCA1	900.00	2.9%	3.7%	**2.0%**	**2.8%**	1.0%	1.8%
2xMARCA2	300.00	8.4%	8.4%	**7.3%**	**7.4%**	6.2%	6.3%
3xMARCA2	450.00	7.3%	7.7%	**6.3%**	**6.7%**	5.2%	5.5%
4xMARCA2	600.00	5.6%	6.4%	**4.6%**	**5.4%**	3.5%	4.3%

Venta a	0.04	SUBA DE TARIFA		TARIFA ESTABLE		BAJA DE TARIFA	
Generador	**kW**	**Sin venta**	**Con venta**	**Sin venta**	**Con venta**	**Sin venta**	**Con venta**
2xMARCA1	450.00	5.8%	6.2%	**4.8%**	**5.2%**	3.7%	4.1%
3xMARCA1	675.00	4.6%	6.3%	**3.6%**	**5.3%**	2.6%	4.2%
4xMARCA1	900.00	2.9%	6.2%	**2.0%**	**5.3%**	1.0%	4.2%
2xMARCA2	300.00	8.4%	8.6%	**7.3%**	**7.6%**	6.2%	6.5%
3xMARCA2	450.00	7.3%	8.8%	**6.3%**	**7.8%**	5.2%	6.6%
4xMARCA2	600.00	5.6%	8.8%	**4.6%**	**7.8%**	3.5%	6.6%

XI. BIOGRAFÍAS



Ventura Nunes (M) Ingeniera. Electricista egresada de la Universidad de la República.
Jefe del Departamento de Potencia del Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería.



Jose Cataldo. Profesor Titular de la Universidad de La República y Director del Instituto de Mecánica de los fluidos e Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería. Graduado con el titulo de Ingeniero Industrial Mecánico (1986) y Doctor en Ingeniería Mecánica de los Fluidos Aplicada (1998).



Gonzalo M. Casaravilla (S'89-M'91) recibió en 1990 el título de Ingeniero Electricista de la Universidad de la República. Desde 1986 se desempeña como docente del Departamento de Potencia del Instituto de Ingeniería Eléctrica y es actualmente Profesor Adjunto siendo su campo de especialidad la Electrónica de Potencia.



Raul Zeballos recibió en 1980 el título de Ingeniero Industrial Opción Potencia de la Universidad de la República. Desde 1986 se desempeña como docente del Departamento de Potencia del Instituto de Ingeniería Eléctrica y es actualmente Profesor Adjunto siendo su campo de especialidad las Máquinas Eléctricas.